Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Experimental Investigation and Numerical Simulation of Bending Parameters on the Spring Back of the Tube in the Rotational Bending Process

Research Article

Majid Elyasi [1], Farzad Ahmadi Khatir[2], Vahid Modanloo [3], Hossein Talebi Ghadikolaee [4]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84485.1204

1-Introduction

Due to their high strength-to-weight ratio, tube parts are widely used in important industries, such as aircraft, automobile, oil, and gas manufacturing. Today, among the types of bending methods, rotary draw bending is known as the most common and controlled tube-bending method. This research aims to provide a method that can minimize one of the tube-forming defects, which is the amount of springback. One of the achievements of this research is that a new method of rotary draw bending with a variable curvature bending die is presented. Unlike conventional methods that bend hollow tubes with a round cross-section with a fixed radius, in this method, to achieve the minimum bending radius, the tube is gradually changed from a large radius to a small radius. One of the advantages of using a die with a variable radius compared to a fixed radius is making it possible to reduce the bending ratio to improve the amount of springback. However, simultaneously, it prevented the tube from tearing and wrinkling.

2- Simulation

In this research, in order to investigate the bending mechanism, the rotary draw bending process of the tube was modeled by the ABAQUS software. The tube geometry is modeled as three-dimensional and shell deformable (S4R), and the die components are modeled as a discrete rigid (R3D4) in the software. The workpiece is assumed to be elastoplastic with isotropic strain hardening. In order to obtain the optimal mesh size, strain convergence was used in the outer curvature of the bent tube and finally, after checking the results, the value of 0.001 m was chosen for the mesh size of the tube and the value of 0.006 m was chosen for the mesh size of the dies.

3- Experiment

In order to conduct experimental tests, an aluminum 6063 tube with an external diameter of 25 mm and a wall thickness of 1.8 mm was used. In the fixed radius bending method, two bending dies were used. In this research, to determine the curve of the bending die with a variable radius, an involute curve was considered as the equation of the geometric location of the variable curvature of the bending die, and the amount of changes in the selected bend was calculated based on an involute curve. The curvature of the bending die based on the involute curve is shown in Figure 1.

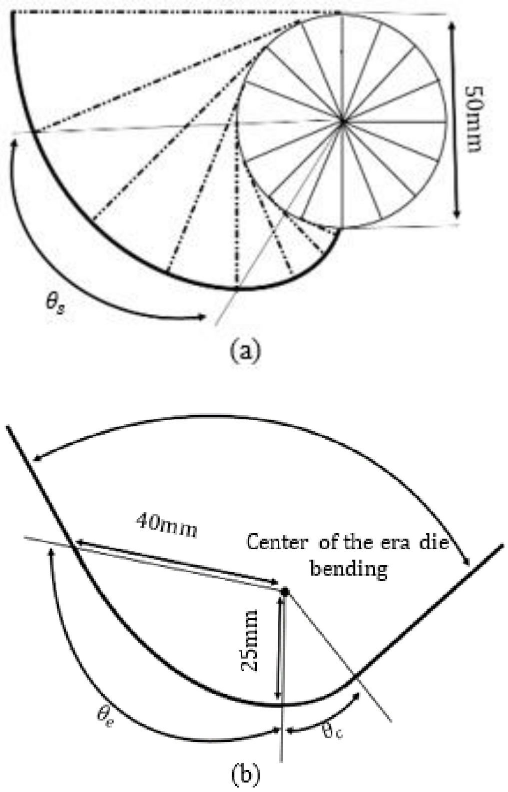


Fig. 1. (a) Position of minimum radius bending; (b) Bending range with fixed radius (R=1D) and variable radius

4- Results and Discussion

In the experimental tests of rotary draw bending, after bending, the elastically deformed part tends to return to its

*Manuscript received: May 16, 2023. Revised, September 26, 2023, Accepted, November 12, 2023.

[1] Corresponding Author: Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Babol, Iran. **Email**: elyasi@nit.ac.ir
[2] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
[3] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Kerman, Iran.
[4] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

original state, which leads to a decrease in θ and springback. External tension and internal pressure in the longitudinal direction of the bent tube are the major parts of the tube's deformation. There are also major changes that lead to springbacks. The radius of the curvature of the bend after springback is obtained from relations 1-3. Figure 2 shows the changes of the equivalent strain in terms of the bend radius in the case of no internal fluid pressure.

$$R' = \frac{R}{1 - \frac{K}{E} \cdot \left\{ \frac{d_0}{2R} + \frac{t_0}{R} \left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_S}{K} \right)^{\frac{1}{n}}} - 1 \right] \right\}^{n-1}} \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta' \quad (2)$$

$$\Delta\theta = \theta \cdot \frac{K}{E} \cdot \left\{ \frac{d_0}{2R} + \frac{t_0}{R} \left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_S}{K} \right)^{\frac{1}{n}}} - 1 \right] \right\}^{n-1} \quad (3)$$

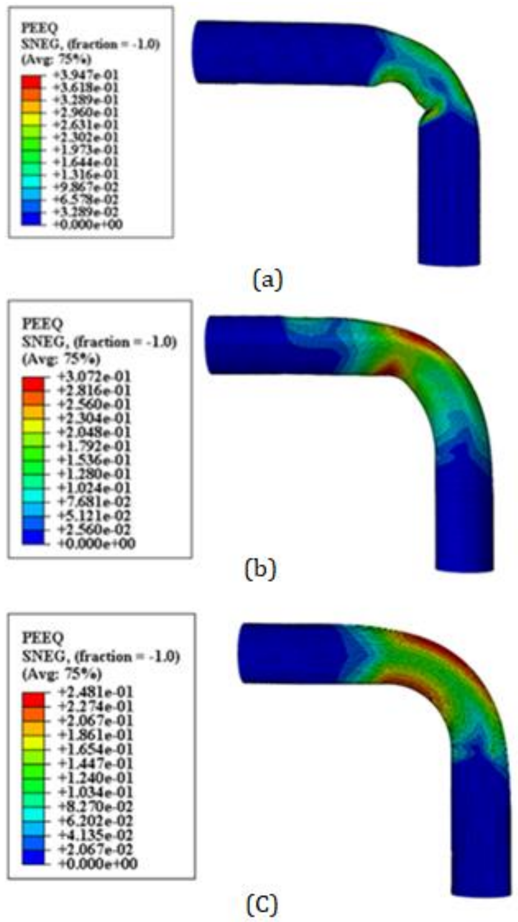


Figure 2. Equivalent strain values in different bend ratios in the state without fluid internal pressure, a) R=1D, b) R=1.6D, c) variable bend radius

5- Conclusion

The results of this research are summarized as follows:

1- The springback angle in the lack of internal fluid pressure was measured in the ratio of bend radius to diameter 1, 1.6, and variable bend radius 1.56, 2.08, and 1.83 degrees, respectively.

2- The results showed that reducing the bending ratio has a significant effect on the springback of the tube.

3- Increasing the pressure from 0 MPa to 3.8 MPa does not have a significant effect on the springback.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پارامترهای خم‌کاری بر میزان برگشت فنری لوله در فرایند خم‌کاری کششی دورانی*

مقاله پژوهشی

مجید الیاسی [۱] فرزاد احمدی خطیر [۲] وحید مدانلو [۳] حسین طالبی قادیکلایی [۴]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84485.1204

چکیده *خم‌کاری لوله‌های آلومینیومی با نسبت خم بحرانی نیازمند به کارگیری روش‌های نوین خم‌کاری می‌باشد. در این پژوهش روش جدیدی از خم‌کاری کششی دورانی با قالب خم انحنای متغیر ارائه شده است. برخلاف روش‌های مرسوم که لوله‌های توخالی با سطح مقطع گرد با یک شعاع ثابت خم می‌شوند، در این روش به صورت تدریجی از یک شعاع بزرگ به شعاع کوچک تغییر شکل می‌دهد. برای تعیین انحنای قالب خم، یک منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنای متغیر قالب خم در نظر گرفته شده است. با توجه به توسعه هیدروفرمینگ لوله‌ها، سیال تحت فشار به جای مندرل در فرایند خم‌کاری کششی دورانی لوله استفاده شده است. برای این منظور یک لوله جدار نازک آلومینیومی از آلیاژ ۶۰۶۳ (با نسبت قطر به ضخامت برابر ۱۳/۸۸) تهیه شده است. سپس توسط خم‌کاری کششی دورانی در نسبت شعاع خم به قطر ۱، ۱/۶ و انحنای متغیر با زاویه ۹۰ درجه خم گردیده است. تأثیر فشار سیال داخلی و انحنای قالب خم بر میزان برگشت فنری لوله با استفاده از شبیه‌سازی و تست‌های تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در یک فشار ثابت، برگشت فنری لوله خمیده توسط قالب خم شعاع متغیر نسبت به قالب خم شعاع ثابت کمتر می‌باشد. فشار داخلی بر روی برگشت فنری لوله خمیده تأثیر نامحسوسی دارد.*

واژه‌های کلیدی خم‌کاری، قالب شعاع متغیر، فشار سیال هیدروفرمینگ، برگشت فنری لوله.

Experimental Investigation and Numerical Simulation of Bending Parameters on the Spring Back of the Tube in the Rotational Bending Process

Majid Elyasi Farzad Ahmadi Khatir Vahid Modanloo Hossein Talebi Ghadikolaee

Abstract *Tube bending with a critical bending ratio necessitates the exploration of new bending methods. This research introduces a novel approach to rotational bending using a variable curvature bending die. Unlike conventional techniques that employ fixed-radius bending for hollow tubes with a round cross-section, this method gradually transitions the shape from a large radius to a small radius. To determine the curvature of the bending die, we employ an involute curve as the geometric equation governing the variable curvature of the bending die. With the advancement of tube hydroforming, pressurized fluid is employed instead of a mandrel in the rotational bending process. To investigate this, a thin-walled aluminum tube composed of 6063 alloys (with a D/t ratio of 13/88) is prepared and subjected to rotational tensile bending at critical bending radius ratios of D1, D1.6, and variable curvature, all at a 90-degree angle. Both simulation and experimental tests are utilized to analyze the impact of internal fluid pressure and bending die curvature on tube springback. The results demonstrate that, under constant pressure conditions, the use of a variable-radius bending die results in reduced springback compared to a fixed-radius bending die. Furthermore, the effect of internal pressure on the springback of the bent tube is found to be negligible.*

Key Words Bending, Variable radius die, Fluid hydroforming pressure, Tube spring back.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۶/۲۶و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

(۲) استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، کرمان، ایران.

(۴) استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

Email: elyasi@nit.ac.ir

مقدمه

در گذشته انجام عملیات خم‌کاری لوله یک هنر تلقی می‌شد و نوعا توسط افراد ماهر و با تجربه صورت می‌گرفت. در چند دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در خم‌کاری لوله‌ها به منظور ایجاد دانش پایه در این زمینه صورت گرفته است. به کمک کارهای تجربی، تحلیل‌های تئوری و شبیه‌سازی عددی درک بهتری از نحوه تغییر شکل لوله در حین خم‌کاری فراهم شده است. قطعات لوله‌ای به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا امروزه در صنایع مهمی همچون هواپیماسازی، خودروسازی، نفت و گاز و... به صورت وسیعی به کار گرفته می‌شوند [1,2]. از لحاظ شرایط بارگذاری، انواع خم‌کاری لوله به خم‌کاری خالص، خم‌کاری تحت فشار، خم‌کاری کششی، خم‌کاری غلتکی، خم‌کاری فشاری، خم‌کاری کوبه‌ای، خم‌کاری به همراه سیال و خم‌کاری کششی دورانی تقسیم می‌شود. امروزه در میان این روش‌ها، خم‌کاری کششی دورانی به عنوان معمول‌ترین و تحت کنترل‌ترین روش خم‌کاری لوله شناخته شده است [3].

از نقطه نظر سختی خم‌کاری، خم‌کاری آسان با شعاع خم‌کاری بزرگ و خم‌کاری دشوار با شعاع خم‌کاری کوچک وجود دارند [4]. انتخاب روش خم‌کاری بستگی به کیفیت خم، تعداد تولید، جنس لوله، شعاع نسبی خم (R/D)، قطر نسبی لوله (D/t) و دقت مورد انتظار دارد که در آن‌ها D قطر خارجی، t ضخامت و R شعاع خط مرکزی خم (CLR) می‌باشد [3]. تاکنون به منظور توسعه علم و تکنولوژی خم‌کاری لوله، تلاش‌های زیادی برای بررسی عیب‌ها، ناپایداری‌ها و انتخاب و بهینه‌سازی پارامترهای شکل‌دهی و قالب انجام شده است. این تلاش‌ها درباره انواع فرایندهای خم‌کاری لوله با شرایط بارگذاری مختلف، توسط کاربرد تحلیلی، روش‌های تجربی، فیزیکی و عددی انجام گرفته است. بدین منظور در ادامه به بررسی مهم‌ترین تحقیقات انجام گرفته در زمینه خم‌کاری لوله پرداخته شده است.

هنگ و همکاران [5] تأثیر پارامترهای خم‌کاری و فرایندی بر بازگشت فنری لوله‌های جدار نازک آلومینیومی را از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود و تست‌های تجربی بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها با توجه به اینکه با افزایش سرعت خم‌کاری، تنش تسلیم افزایش می‌یابد، خم‌کاری با سرعت بیشتر باعث می‌شود که تغییر شکل الاستیک بیشتری به وجود بیاید. در نتیجه برگشت فنری افزایش یابد.

ژیو و همکاران [6] اثر قالب شعاع متغیر را بر کیفیت خم‌کاری لوله‌هایی با مقطع مستطیلی جدار نازک در فرایند خم‌کاری فشاری به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. لوله مورد آزمایش از جنس آلومینیومی با عرض و طول ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر، در محدوده زاویه خم ۱۳۵ درجه انتخاب شده بود. در این مطالعه یک منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنای متغیر قالب خم در نظر گرفته شده و میزان تغییرات خم انتخاب شده بر اساس یک منحنی اینولوت محاسبه شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش زاویه خم، ضخامت بیرونی لوله کاهش و درونی لوله افزایش یافته است.

وانگ و آگاروال [7] خم‌کاری لوله را تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی به روش خم‌کاری کششی دورانی به صورت تحلیلی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که تغییر شکل سطح مقطع و تغییرات ضخامتی که در سطح نمونه رخ می‌دهد را می‌توان با نیروی محوری و فشار داخلی کنترل نمود. سپس، اثر نیروی محوری را مورد بررسی قرار دادند و توانستند با محاسبه نیروی بهینه، چروک را در شعاع داخلی نمونه از بین ببرند.

لازراسکو و همکاران [8] اثر فشار داخلی بر روی بیضوی شدن سطح مقطع، نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی دیواره لوله را در خم‌کاری کششی دورانی لوله‌های آلومینیومی با فشار سیال داخلی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که فشار داخلی اثر قابل توجهی روی کیفیت سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی خمیده دارد. به طوری که با افزایش فشار داخلی، بیضوی شدن سطح مقطع و ضخیم‌شدگی دیواره کاهش و نازک‌شدگی دیواره لوله افزایش می‌یابد. همچنین اثر فشار سیال روی نازک‌شدگی دیواره بسیار بیشتر از اثر آن روی ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای داخلی به دست آمده است.

ون و همکاران [9] یک روش جدیدی از خم‌کاری کششی دورانی ارائه دادند که برای خم‌کاری لوله با قطرهای بیرونی مختلف در شرایط بدون مندرل مناسب است. در مقایسه با لوله‌های خم شده در روش مرسوم، لوله خم شده با قالب جدید دارای نیروهای تماسی و حالت‌های کرنش متفاوتی در شیار قالب خم است که سبب توزیع تنش، کرنش و رفتار تغییر شکل متفاوت می‌شود. در کل، کیفیت خم‌کاری از نظر تغییر شکل سطح مقطع نازک‌شدگی دیواره لوله‌های خم شده توسط قالب جدید در شرایطی که قطر لوله کوچک‌تر یا مساوی با قطر شیار قالب نگه‌دارنده باشد، نسبت به روش مرسوم مناسب‌تر است.

الیاسی و همکاران [10,11] در ابتدا تأثیر فشار سیال داخلی در دماهای بالا را بر کیفیت خم لوله آلومینیومی در خم‌کاری کششی دورانی بررسی نمودند. نتایج کار این محققان نشان داد که دو پارامتر فشار و دما اثر قابل توجهی روی کیفیت سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی دارد. به طوری که با افزایش فشار داخلی، عدم گردی سطح مقطع و ضخیم‌شدگی دیواره کاهش یافته است. در ادامه این محققان پارامترهای مؤثر بر خم‌کاری لوله را به صورت تحلیلی بررسی نمودند. در این روش، تأثیر جابه‌جایی تار خنثی بر توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله شکل داده شده بررسی شد و نتایج قابل قبولی به دست آمده که با مقایسه آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی اثبات شده است.

هدف از این پژوهش ارائه روشی است که بتوان یکی از عیوب شکل‌دهی لوله که میزان برگشت فنری می‌باشد را به حداقل رساند و به خم با کیفیت مطلوب و شعاع بحرانی دست یافت. یکی از دست‌آوردهای این پژوهش این است که در آن روش جدیدی از خم‌کاری کششی دورانی با قالب خم انحنای متغیر ارائه می‌گردد. برخلاف روش‌های مرسوم که لوله‌های توخالی با سطح مقطع گرد با یک شعاع ثابت خم می‌شوند، در این روش برای دستیابی به شعاع مینیمم خم، لوله به صورت تدریجی از یک شعاع بزرگ به شعاع کوچک تغییر شکل می‌دهد. که شعاع کوچک برابر قطر خارجی لوله است. کاهش نسبت خم تأثیر به‌سزایی در بازگشت فنری لوله دارد. از مزایای استفاده از قالب با شعاع متغیر نسبت به شعاع ثابت در این است که می‌توان نسبت خم را کاهش داد تا باعث بهبود در مقدار برگشت فنری شود. اما در عین حال از پارگی و چروکیدگی لوله جلوگیری نمود.

شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش به منظور بررسی مکانیزم خم‌کاری، فرایند خم‌کاری کششی دورانی لوله با دو روش قالب شعاع ثابت و شعاع متغیر به همراه فشار سیال داخلی با کمک نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در ادامه مدل‌سازی فرایند و نحوه تحلیل بیان گردیده است.

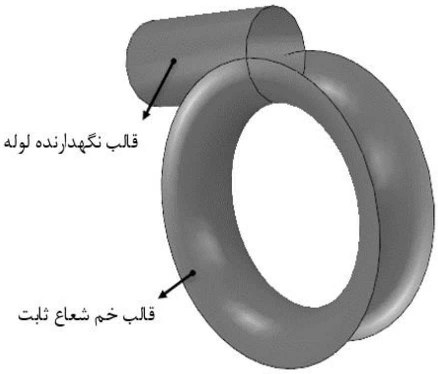
مدل‌سازی فرایند

دو نوع قالب، یکی شعاع ثابت با نسبت خم به قطر یک و ۱/۶ و دیگری شعاع متغیر مدل‌سازی گردید. با توجه به تقارن مسئله، نیمی از مدل طراحی شده و سپس با توجه به صفحه تقارن گسترش داده شد. هندسه لوله به صورت پوسته سه‌بعدی و شکل‌پذیر و اجزای قالب به صورت پوسته‌ای صلب و گسسته در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. قطعه‌کار به صورت الاستو-پلاستیک با کرنش سختی همسان‌گرد فرض شده است. به منظور تعریف خواص مکانیکی لوله از معادله کرنش سختی سوئیفت مطابق رابطه (۱) استفاده شده است. در این رابطه K ضریب استحکام، ε_0 کرنش اولیه و n توان کارسختی نامیده می‌شود که مقدار این ضرایب با استفاده از آزمون تجربی تست کشش که در ادامه بدان پرداخته شده است، استخراج گردید [12].

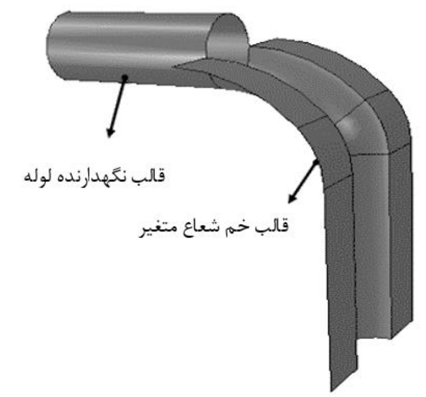
$$\bar{\sigma} = k(\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^n = 274.282(\bar{\varepsilon} + 0.203)^{0.286} \qquad (۱)$$

در این معادله ضریب استحکام برابر ۲۷۴/۲۸۲، کرنش اولیه ۰/۲۰۳ و توان کارسختی ۰/۲۸۶ به دست آمده است. با توجه به تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی استفاده شده است. برای کاهش زمان محاسبات، زمان شکل‌دهی ۱ ثانیه در نظر گرفته شد و همواره دقت شده تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل از یک درصد مجموع انرژی داخلی شکل‌دهی تجاوز نکند تا طبیعت شبه استاتیکی مسئله حفظ شود. کلیه تماس‌ها از نوع تماس سطح به سطح و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی استفاده شده است. به منظور تعریف رفتار اصطکاکی از مدل ضرایب اصطکاکی کولمب و شرایط تماسی پنالتی با مقدار ضریب ۰/۱۲۵ مطابق مرجع [8] تعریف شده است. المان به کار رفته در مدل لوله از نوع S4R انتخاب شد که یک المان چهارگرهی از گروه ورق‌ها، مناسب و رایج در استفاده‌های معمول تحلیل ورق، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته، با قابلیت کنترل پدیده Hourglass و حل مسائل با کرنش‌های محدود بوده که از معروف‌ترین المان‌های مورد استفاده در تحلیل مسائل لوله و ورق‌ها می‌باشد. برای قالب‌ها از المان چهارگرهی R3D4 استفاده شده که المانی سه‌بعدی، دوخطی و صلب است و برای اجسام صلبی که نیاز به تحلیل ندارند، استفاده می‌شود. برای به دست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی از هم‌گرایی کرنش در انحنای بیرونی لوله خمیده استفاده شد و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار ۰/۰۰۱ برای عدد دانه‌بندی لوله و مقدار ۰/۰۰۶ برای عدد دانه‌بندی قالب‌ها انتخاب شد. شکل (۱) نمای کلی از مدل شبیه‌سازی شده را

برای دو حالت قالب شعاع ثابت و قالب شعاع متغیر نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱ (الف) مدل‌سازی قالب با شعاع ثابت با نسبت یک برابر و ۱/۶ برابر قطر و (ب) مدل‌سازی قالب با شعاع متغیر بر اساس منحنی اینولوت

معیار گلویی شدن

به منظور پیش‌بینی گلویی شدن و همچنین پارگی در ناحیه خم از معیار گلویی شدن در شبیه‌سازی استفاده شده است. یکی از معیارهای پرکاربرد، معیار کرنش پلاستیک معادل است. کمیت اسکالر کرنش پلاستیک معادل بیانگر تغییر شکل‌های غیر الاستیک ماده است، به طوری که مقدار مثبت آن نشان‌دهنده تسلیم شدن ماده است [13]. افزایش ناگهانی شیب کرنش پلاستیک معادل یک المان در مقایسه با رفتار سایر المان‌ها، نشان‌دهنده شروع ناپایداری در آن المان می‌باشد [14]. مقدار کرنش پلاستیک معادل از رابطه (۲) به دست می‌آید. در این رابطه $\bar{\varepsilon}_0^{PI}$ و $\dot{\varepsilon}^{PI}$ به ترتیب کرنش پلاستیک معادل اولیه و نرخ جریان پلاستیکی متناظر است. از آنجایی که همواره پارگی در انحنای خارجی خم رخ می‌دهد، در طول فرایند شبیه‌سازی مقدار کرنش پلاستیک معادل المان‌ها برای پیش‌بینی گلویی شدن بررسی شده است.

$$\bar{\varepsilon}^{PI} = \bar{\varepsilon}_0^{PI} + \int_0^t \sqrt{\left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}^{PI}:\dot{\varepsilon}^{PI}\right)} \qquad (۲)$$

مراحل آزمایشگاهی

تجهیزات لازم برای انجام آزمون‌ها

به منظور انجام آزمون‌های تجربی از لوله آلومینیومی با قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱/۸ میلی‌متر با گروه آلیاژی ۶۰۶۳ استفاده شده است. آلیاژهای این گروه عملیات حرارتی پذیر بوده و مقاومت به خوردگی بالا و خاصیت جوش پذیری خوبی دارند. لذا به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور خم‌کاری این لوله‌ها از دستگاه خم‌کاری کششی دورانی همراه با فشار سیال استفاده شده است. سرعت خم‌کاری در طول فرایند یکسان در نظر گرفته شده است. سیستم هیدرولیکی این دستگاه قابلیت اعمال فشار تا ۲۰ مگاپاسکال (۲۰۰ بار) را دارد. همچنین بر روی دستگاه، مجموعه اعمال فشار سیال جهت تأمین فشار داخلی لوله تعبیه شده و قابلیت ایجاد فشار تا ۱۰ مگاپاسگال (۱۰۰ بار) را داراست.

برای آب‌بندی دو انتهای لوله از مهره، ماسوره و بوش استاندارد استفاده شد. پس از ورود روغن به درون لوله و هواگیری، درپوش آن بسته شده و فشار سیال با استفاده از فشارسنج و شیر اطمینان، روی میزان دل‌خواه تنظیم گردیده و در تمام طول کورس خم‌کاری فشار ثابت در نظر گرفته می‌شود.

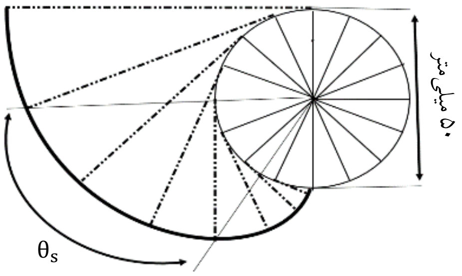
همان طور که ذکر شد، در روش خم‌کاری با شعاع ثابت از دو قالب خم‌کن استفاده شد که شعاع خم‌کاری هر کدام که همان شعاع قالب خم‌کن است برابر ۴۰ و ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. برای تعیین منحنی قالب خم با شعاع متغیر می‌توان از منحنی‌های متفاوت استفاده کرد. هر یک از این منحنی‌ها بسته به نوع طراحی می‌توانند تابع منحنی‌های متفاوتی مانند منحنی‌های اینولوتی، هذلولوی، سیکلوئید، هیپوسیکلوئید بیزیر و غیره باشند. در این پژوهش یک منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنای متغیر قالب خم در نظر گرفته شده است و میزان تغییرات خم انتخاب شده، بر اساس یک منحنی اینولوت محاسبه شده است [6]. نحوه انتخاب انحنای قالب خم

بر اساس منحنی اینولوتی در شکل (۲) نشان داده شده است. شعاع متغیر قالب خم به گونه‌ای انتخاب شد که قالب خم بتواند لوله را از نسبت خم ۱/۶ به نسبت ۱ در حین خم‌کاری برساند. شعاع دایره اینولوت ۲۵ میلی‌متر می‌باشد که برابر با شعاع مینیمم خم‌کاری است. اگر انحنای متغیر لوله به سوی ۹۰ درجه خم شده باشد، شعاع خم مینیمم ۲۵ میلی‌متر است. محدوده خمش انتخاب شده را می‌توان بر اساس روابط ۳ تا ۵ محاسبه کرد. جنس کلیه اجزای قالب از فولاد MO40 انتخاب شد. در شکل (۳) دستگاه خم‌کاری که قالب‌ها با شعاع ثابت و متغیر بر روی آن قرار می‌گیرد، به همراه تجهیزات آن نشان داده شده است.

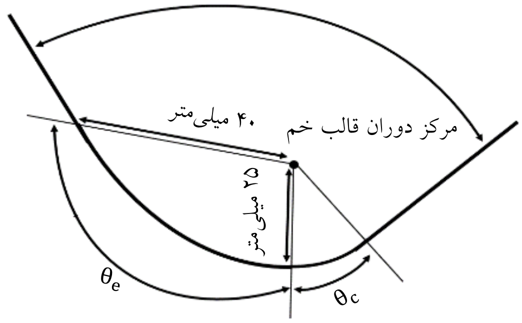
(۳) موقعیت شعاع خمش مینیمم $(\theta_s) = \frac{r}{d}\frac{180^\circ}{\pi} = 57.5^\circ$

(۴) محدوده خمش با شعاع متغیر $(\theta_e) = 80^\circ$

(۵) دامنه خمش با شعاع ثابت (r=D) $(\theta_c) = 45^\circ$

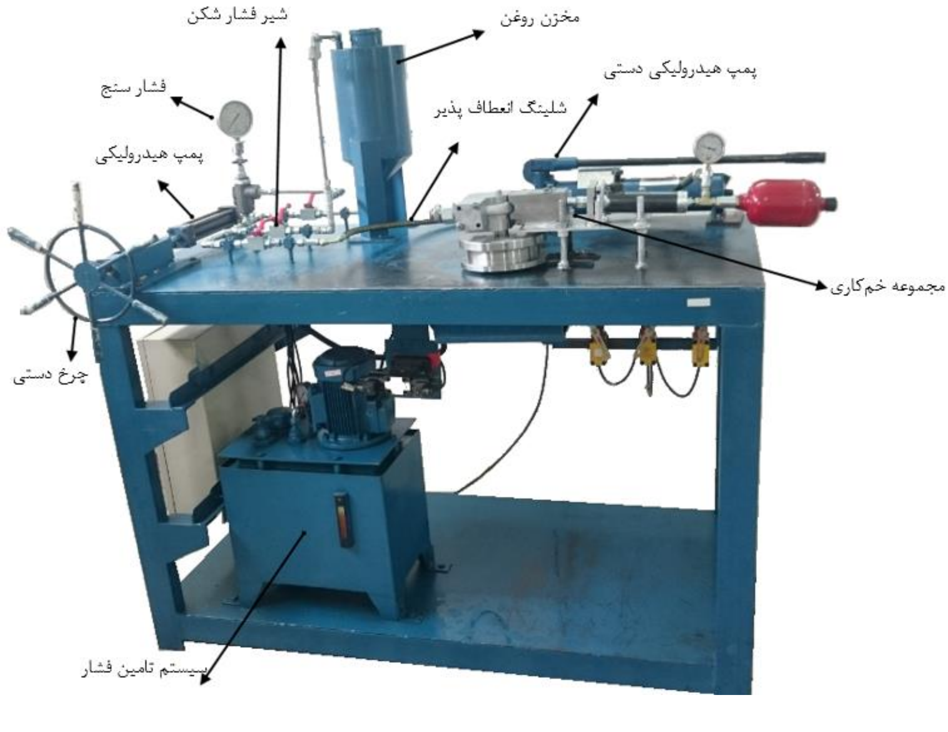


(الف)



(ب)

شکل ۲ انتخاب محدوده خم شدن، (الف) موقعیت شعاع خم مینیمم، (ب) محدوده خم با شعاع ثابت یک برابر قطر و شعاع متغیر

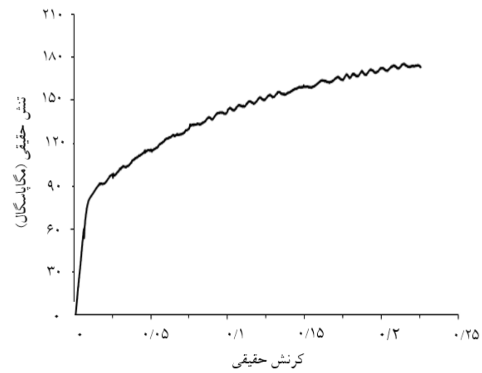


شکل ۳ مجموعه قالب‌های مورد استفاده برای خم

تعیین خواص مکانیکی لوله

به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله و به دست آوردن نمودار تنش- کرنش آن، نمونه‌هایی از لوله طبق استاندارد ASTM-A370 تهیه شده‌اند. برای انجام تست کشش لوله، مطابق استاندارد دو عدد مندرل ساخته شد که در دو انتهای لوله قرار گرفته است. نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه آزمایش کشش انیورسال SANTAM مدل STD-600 با ظرفیت ۶۰ تن، تا حد پارگی کشیده شدند.

در شکل (۴) نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از انجام آزمون نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱) خواص فیزیکی و مکانیکی به دست آمده مطابق با معادله سوئیفت برای استفاده در مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد.



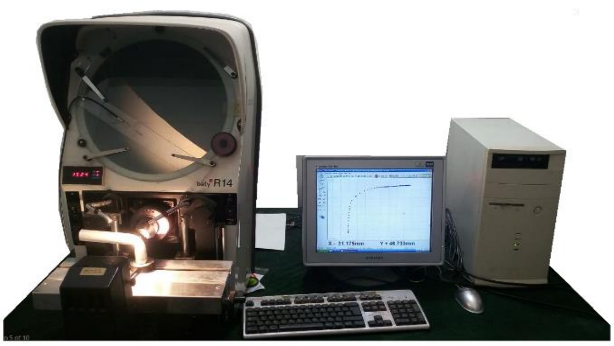
شکل ۴ نمودار تنش- کرنش لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی لوله آلومینیومی ۶۰۶۳

پارامتر	واحد	مقدار
استحکام کشش نهایی	مگاپاسگال	۱۷۳/۶۸۹
تنش تسلیم ۰/۲ درصد	مگاپاسگال	۹۰/۱۱۴
حداکثر ازدیاد طول	درصد	۲۶
نمای کرنش سختی	–	۰/۲۸۶
ضریب استحکام	مگاپاسگال	۲۷۴/۲۸۲
مدول یانگ	گیگاپاسگال	۶۸/۳
ضریب پواسون	–	۰/۳۳
چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب	۲۹۶۰

دستگاه پروفایل پروژکتور

از این دستگاه برای اندازه‌گیری زاویه برگشت فنری لوله خم شده بعد از باربرداری استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری ابعادی آن ۰/۰۰۱ میلی‌متر بوده و دارای یک صفحه گردان به موازات محور افق با زاویه ۳۶۰ درجه و دقت ۱ درجه است که برای چرخش میز دستگاه استفاده می‌شود. این میز در راستای محور x و y هم حرکت خطی داشته و توسط میکرومتر کنترل می‌شود. دقت این ریزسنج‌ها ۰/۰۰۵ میلی‌متر و دامنه اندازه‌گیری آن محدود می‌باشد. کلگی دستگاه در راستای محور z حرکت بالا و پایین داشته و تثبیت می‌شود. این حرکت به دلیل تنظیم مناسب لنز دستگاه با چشم اپراتور می‌باشد. کلگی حول محور y به اندازه ۲۵ درجه قابل تنظیم بوده که ۱۲/۵ درجه در جهت ساعت و ۱۲/۵ درجه در جهت پاد ساعت می‌باشد. همان طور در شکل (۵) نشان داده شده است، لوله روی دستگاه می‌گیرد و سپس داده‌های پروفیل مقطع به عنوان فایل DXF ذخیره شده و سپس به نرم‌افزار اتوکد مکانیکال وارد شده و بازگشت فنری اندازه‌گیری می‌شود.

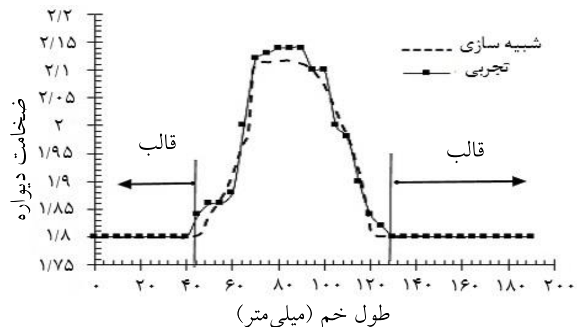


شکل ۵ دستگاه پروفایل پروژکتور مدل bty سری R14

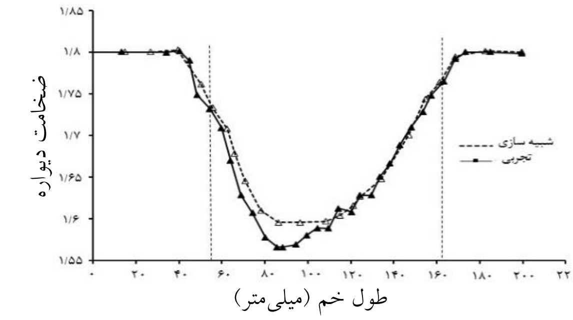
نتایج و بحث

اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

به منظور اعتبارسنجی مدل اجزای محدود به کار گرفته شده در این پژوهش، نتایج توزیع ضخامت به دست آمده توسط مدل شبیه‌سازی شده، در نسبت شعاع خم ثابت ۱/۶ برابر قطر و شعاع متغیر در حالت بدون فشار داخلی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. همان گونه که در شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی حاضر مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. حداکثر اختلاف کمتر از ۸/۵ درصد می‌باشد. این میزان اختلاف حاصل فرضیات در نظر گرفته شده همچون فرض تنش صفحه‌ای بودن و همسان‌گرد بودن جنس لوله، عدم یکنواختی جنس لوله در آزمایش‌ها، عدم دقت هندسه لوله در دایروی بودن و یکنواختی ضخامت لوله و همچنین عدم یکنواختی ضرایب اصطکاک در سطح قالب‌ها می‌باشد.

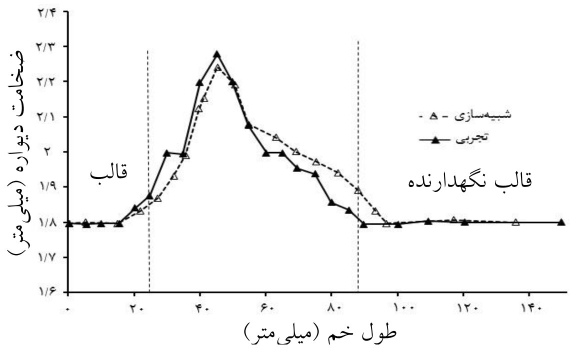


(الف)

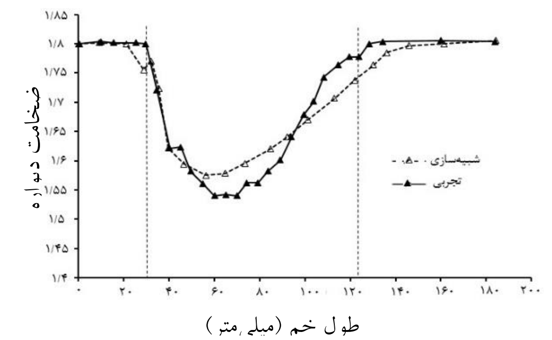


(ب)

شکل ۶ نمودار تغییرات ضخامت بر حسب طول خم در نسبت شعاع خم ۱/۶ برابر قطر و در حالت بدون فشار داخلی سیال، (الف) قوس بیرونی خم و (ب) قوس داخلی خم



(الف)



(ب)

شکل ۷ نمودار تغییرات ضخامت بر حسب طول خم در نسبت شعاع خم متغیر در حالت بدون فشار داخلی سیال، (الف) قوس بیرونی خم و (ب) قوس داخلی خم

تأثیر انحنای خم و فشار سیال بر روی برگشت فنری

در آزمون‌های تجربی خم‌کاری کششی دورانی، پس از آن که لوله خم شده از قید قالب‌های فشار، خم و نگه‌دارنده لوله آزاد شد (اتمام بارگذاری)، قسمتی که به صورت الاستیک تغییر شکل یافته تمایل به برگشت به حالت اولیه دارد که منجر به کاهش θ و برگشت فنری می‌شود. کشش بیرونی و فشار درونی در جهت طولی لوله خم شده یک بخش عمده‌ای در تغییر شکل لوله می‌باشند. آن‌ها همچنین تغییرات عمده‌ای هستند که منجر به برگشت فنری می‌شوند.

شعاع انحنای خم بعد از برگشت فنری از رابطه (۶) به دست می‌آید [15].

$$R' = \frac{R}{1-\frac{K}{E}\left\{\frac{d_0}{2R}+\frac{t_0}{R}\left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{\sigma_s}{K}\right)^{\frac{1}{n}}}-1\right]\right\}^{n-1}} \quad (۶)$$

از رابطه (۶) می‌توان دریافت که مقدار برگشت فنری انحنای لوله خم شده از زاویه خم‌کاری مستقل است. به طور دقیق، شکل لوله خم شده، یک قوس کامل بعد از برگشت فنری نیست. بنابراین خیلی مشکل است که به صورت دقیق از شعاع خم برای توصیف انحنای لوله خم شده بعد از برگشت فنری بتوان استفاده کرد. R' در واقع یک مقدار تقریبی است. همچنین از رابطه ۶ می‌توان دریافت که انحنای خم بعد از برگشت فنری از خم شدن در زمان بارگذاری کمتر است. در واقع R' بزرگ‌تر از R است. یعنی با افزایش R مقدار R' افزایش می‌یابد.

زاویه برگشت فنری لوله خم شده بعد از اتمام بارگذاری از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$\Delta\theta = \theta - \theta' \quad (۷)$$

θ زاویه خم‌کاری در مدت زمان بارگذاری و θ' زاویه خم واقعی بعد از باربرداری است. با فرض اینکه محور مرکزی لوله بعد از برگشت فنری مشابه یک قوس کامل است، پس $R\theta = R'\theta'$ به دست می‌آید. به عبارتی $\theta' = \theta \cdot \frac{R}{R'}$ می‌باشد. لذا زاویه برگشت فنری بعد از باربرداری توسط رابطه (۸) به دست می‌آید [14]:

$$\Delta\theta = \theta \cdot \frac{K}{E} \cdot \left\{\frac{d_0}{2R}+\frac{t_0}{R}\left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{\sigma_s}{K}\right)^{\frac{1}{n}}}-1\right]\right\}^{n-1} \quad (۸)$$

رابطه (۸) بیانگر آن است که اگر زاویه خم‌کاری (θ) افزایش یابد، برگشت فنری متناسب با ناحیه تغییر شکل یافته

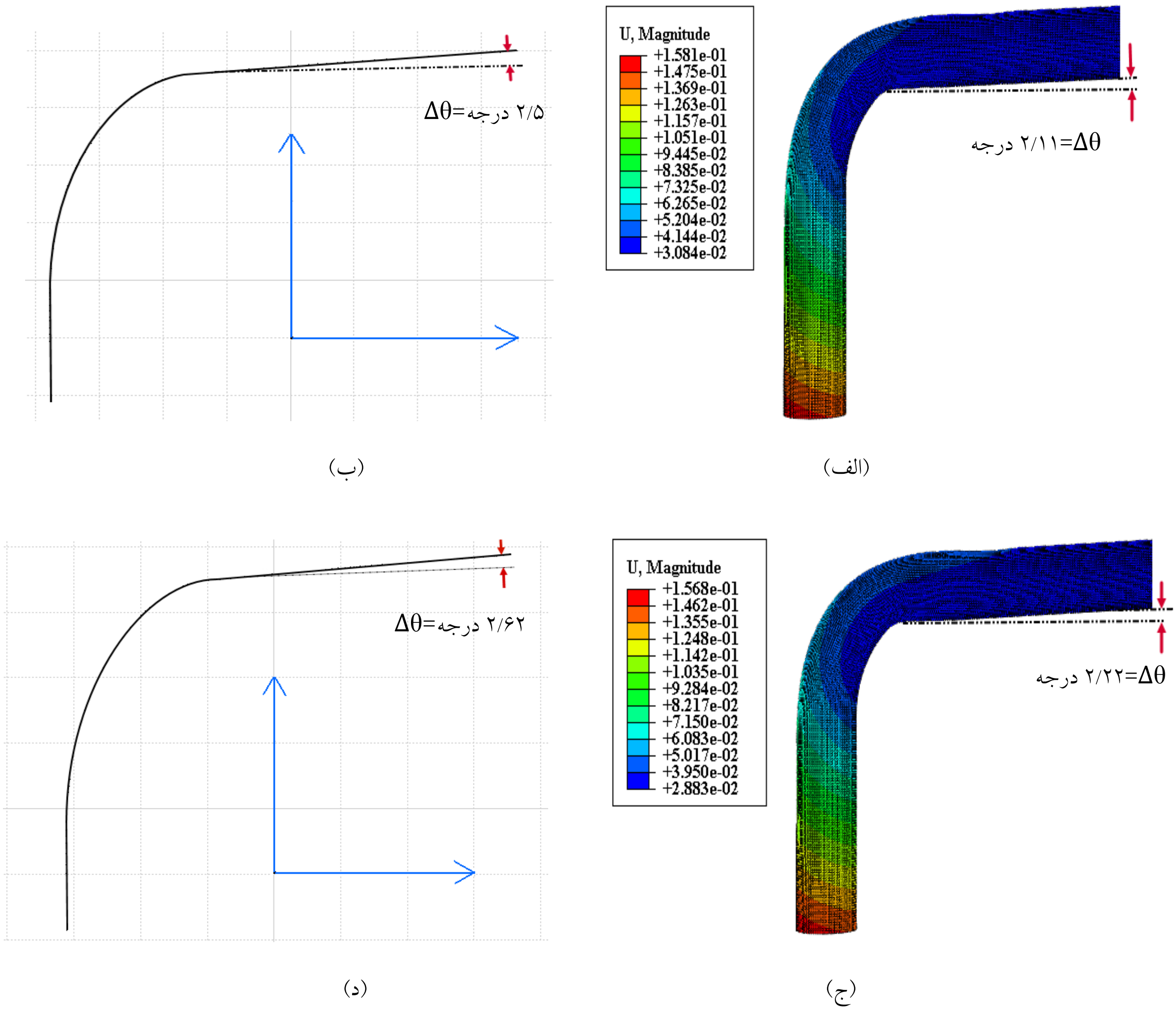
افزایش خواهد یافت. همچنین زاویه بازگشت فنری Δθ نیز افزایش می‌یابد.

مقدار زیاد ضریب استحکام (K)، سبب مقاومت مواد لوله نسبت به تغییر شکل پلاستیک بیشتر می‌شود. همچنین مقدار زیاد مدول یانگ (E)، موجب مقاومت مواد به تغییر شکل الاستیک بیشتر شده و نسبت تغییر الاستیک در فرایند خم‌کاری کاهش می‌یابد. از این رو به طوری که مقدار ضریب استحکام (K) در لوله معین افزایش یابد، همراه با کاهش مدول یانگ (E)، منجر به افزایش زاویه بازگشت فنری Δθ بعد از خم‌کاری می‌شود. مقادیر شعاع بعد از باربرداری در حالت خم با شعاع ثابت، در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲ مقادیر شعاع خم بعد از باربرداری به دست آمده از رابطه (۶)

نسبت شعاع خم (میلی‌متر)	R=1D	R=1.6D
شعاع خم	۲۵	۴۰
شعاع خم بعد از باربرداری	۲۵/۱۵	۴۰/۳۵

مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و تست‌های تجربی در حالت شعاع خم متغیر به منظور اعتبارسنجی و دقت مدل برای پیش‌بینی برگشت فنری لوله‌ها انجام گردید. شکل (۸) نشان می‌دهد که حداکثر تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حدود ۱۵ درصد است.

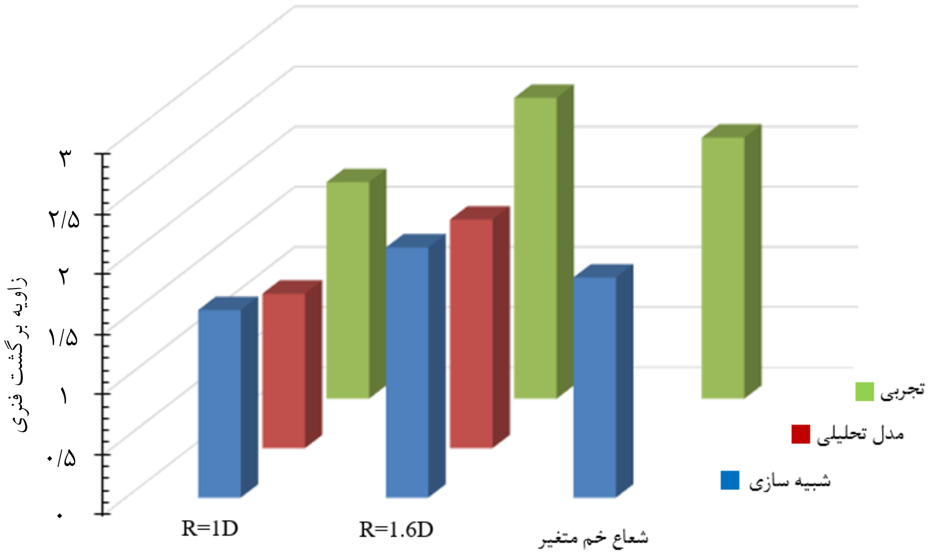


شکل ۸. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی در شعاع خم متغیر برای برگشت فنری: (الف) شبیه‌سازی در فشار ۱/۸ مگاپاسگال، (ب) تجربی در فشار ۱/۸ مگاپاسگال، (ج) شبیه‌سازی در فشار ۳/۲ مگاپاسگال و (د) تجربی در فشار ۳/۲ مگاپاسگال

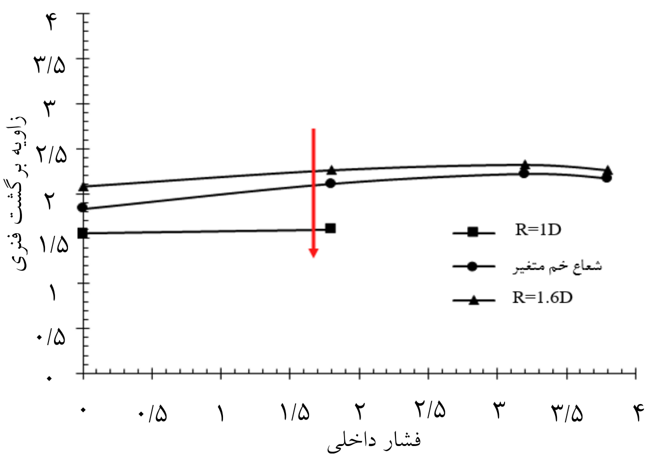
شکل (۹) میزان برگشت فنری لوله را برحسب شعاع خم و فشار سیال داخلی نشان می‌دهد. نکته مهمی که از شکل (۹-الف) برداشت می‌شود این است که با کاهش نسبت خم از ۱/۶ به ۱ در حالت بدون فشار داخلی سیال، میزان برگشت فنری به ترتیب ۲/۵ به ۱/۸ درجه کاهش یافته است. همچنین مقدار آن در شعاع خم متغیر، ۲/۱۷ درجه می‌باشد. کاهش شعاع خم باعث سخت‌تر شدن شرایط شکل‌دهی و افزایش کرنش پلاستیک در محدوده خم‌کاری می‌گردد. در نتیجه این امر، تغییر شکل پلاستیک شدیدتری در منطقه خم‌کاری رخ می‌دهد و نواحی با تغییر شکل الاستیک کاهش می‌یابند.

شبه‌خطی بودن نمودارها در شکل (۹-ب) در تمامی نسبت‌های خم، نشان می‌دهد که افزایش فشار از صفر تا ۳/۸ مگاپاسکال تأثیر کمی بر برگشت فنری دارد. می‌توان نتیجه گرفت که این سطح از فشارها تأثیر محسوسی بر میزان تغییر شکل الاستیک به وجود آمده در منطقه خم ندارد و میزان تغییر شکل الاستیک ذخیره شده در لوله در کلیه فشارها تقریبا یکسان است. کاهش نواحی حامل تغییر شکل الاستیک منجر به کاهش بازگشت فنری می‌گردد.

شکل (۱۰) تغییرات کرنش معادل برحسب شعاع خم در حالت بدون فشارداخلی سیال را نشان می‌دهد.

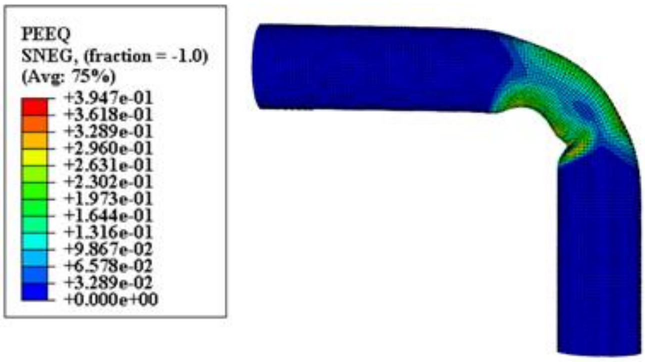


(الف)

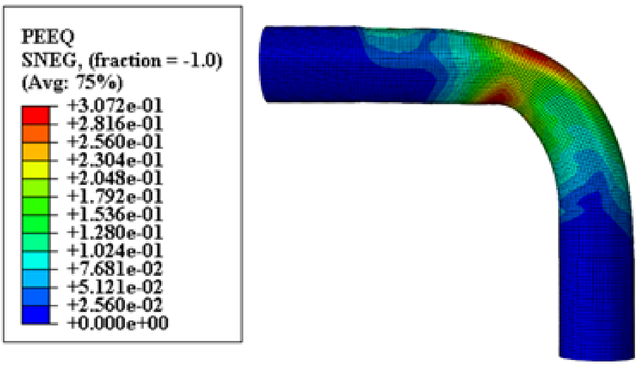


(ب)

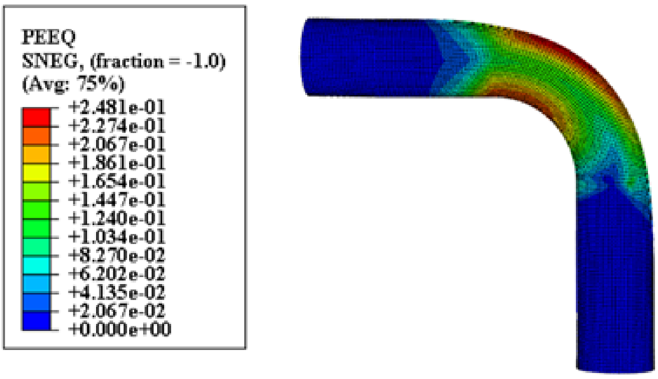
شکل ۹ میزان برگشت فنری در شرایط مختلف: (الف) نتایج به دست آمده از تأثیر نسبت شعاع خم برروی بازگشت فنری، (ب) نتایج به دست آمده از تأثیر فشار سیال بر روی بازگشت فنری



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ مقادیر کرنش معادل در نسبت خم مختلف در حالت بدون فشار داخلی سیال: (الف) R=1D، (ب) R=1.6D، (ج) شعاع خم متغیر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خم‌کاری کششی دورانی هیدرولیکی لوله آلومینیومی با آلیاژ ۶۰۶۳ به منظور بررسی تأثیر ابزار خم‌کاری بر روی کیفیت خم تولید شده، با دو نسبت شعاع خم ثابت و متغیر مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامتر فشار سیال داخلی و انحنای قالب خم بر میزان برگشت فنری لوله‌های خمیده با استفاده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی مشخص گردید. همچنین فشار داخلی بیشینه قابل اعمال نیز به کمک معیار گلویی پیشبینی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

۱. زاویه برگشت فنری در حالت بدون فشار سیال داخلی در نسبت شعاع خم به قطر ۱، ۱/۶ و شعاع خم متغیر به ترتیب ۱/۵۶، ۲/۰۸ و ۱/۸۳ درجه اندازه‌گیری شده است.

۲. نتایج نشان داد که کاهش نسبت خم تأثیر به‌سزایی در بازگشت فنری لوله دارد.

۳. افزایش فشار از صفر تا ۳/۸ مگاپاسکال تأثیر محسوسی بر بازگشت فنری ندارد.

واژه نامه

خم‌کاری	Bending
قالب شعاع متغیر	Variable radius die
فشار سیال هیدروفرمینگ	Fluid hydroforming pressure
برگشت فنری لوله	Tube spring back

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. Zardoshtian, H. Sabet, and M. Elyasi, "Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 95, pp. 697–705, (2018). https://doi.org/10.1007/s00170-017-1255-4

[2] M. Elyasi, M. Paluch, and M. Hosseinzadeh, "Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, pp. 3307–3318, (2017). https://doi.org/10.1007/s00170-016-9042-1

[3] M. Roein, M. Elyasi, and M. J. Mirnia, "Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 66, pp. 27-38, (2021). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.064

[4] M. Roein, M. Elyasi, and M. J. Mirnia, "Development of bending of AISI 304L micro-tubes with micro-wire mandrel and investigation of its effective parameters," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 723-738, (2021). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.029

[3] R. Bihamta, Q.-H. Bui, M. Guillot, G. D'Amours, A. Rahem, and M. Fafard, "Global optimisation of the production of complex aluminium tubes by the hydroforming process," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 9, pp. 1-11, (2015). https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.02.001

[4] Y. He, L. Heng, Z. Zhang, Z. Mei, L. Jing, and L. Guangjun, "Advances and trends on tube bending forming technologies," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 25, no. 1, pp. 1-12, (2012). https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60356-7

[5] L. Heng, K. p. SHI, Y. He, and Y. l. TIAN, "Springback law of thin-walled 6061-T4 Al-alloy tube upon bending," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, pp. s357-s363, (2012). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61731-2

[6] X. Xiao, Y. Liao, Y. Sun, Z. Zhang, Y. P. Kerdeyev, and R. Neperish, "Study on varying curvature push-bending technique of rectangular section tube," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187, pp. 476-479, (2007). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.190

[7] J. Wang and R. Agarwal, "Tube bending under axial force and internal pressure," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 598-605, (2006). https://doi.org/10.1115/1.2112987

[8] L. Lăzărescu, "Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, pp. 85-91, (2013). https://doi.org/10.1007/s00170-012-3992-8

[9] T. Wen, "On a new concept of rotary draw bend-die adaptable for bending tubes with multiple outer diameters under non-mandrel condition," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 2, pp. 311-317, (2014). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.019

[10] V. Modanloo, M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee, F. A. Khatir, and B. Akhoundi, "The use of MCDM techniques to assess fluid pressure on the bending quality of AA6063 heat-treated tubes," *Journal of Engineering Research*, in Press, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.012

[11] M. Elyasi, V. Modanloo, H. Talebi Ghadikolaee, F. Ahmadi Khatir, and B. Akhoundi, "Investigating the effect of heat treatment in hydraulic rotary draw bending of AA6063 tubes," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 257-264, (2023). https://doi.org/10.22034/mme.23.4.257

[12] H. T. Ghadikolaee, F. A. Khatir, and S. Seddighi, "Numerical-experimental study on the thickness distribution of metallic bipolar plates for PEM fuel cells," *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*, vol. 9, no. 1, pp. 1-18, (2022). https://doi.org/10.22104/ijhfc.2021.5217.1230

[13] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, and R. Mahdavinejad, "A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22, pp. 3210-3221, (2013).

[14] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, and B. M. Dariani, "Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 18, pp. 131-140, (2015). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.03.004

[15] D. E, H. H. He, X. Y. Liu, and R. X. Ning, "Spring-back deformation in tube bending," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 16, no. 2, pp. 177-183, (2009). https://doi.org/10.1016/S1674-4799(09)60030-3